

ENSAYOS DE CORRIENTE CONTINUA EN CABLES DE AISLAMIENTO EXTRUIDO

Mayora Hernán, Álvarez Raúl, Calo Emilio, Catalano Leonardo, Morcelle del Valle Pablo

Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos, Facultad de Ingeniería, UNLP. Calle 48 y 116, 1900 La Plata.

E-mail: hernan.mayora@iitree-unlp.org.ar

INTRODUCCION

Los cables de media tensión subterráneos utilizados para la distribución de la energía eléctrica cumplen un rol fundamental en la prestación del servicio y en la confiabilidad de las redes de distribución.

A los fines de evaluar la integridad de los mismos, antes de energizar un sistema de cables, se realizan ensayos de aceptación *in situ*, con el propósito de detectar fallas que podrían haber sido ocasionadas por el transporte, el tendido y la instalación de accesorios. Uno de los más utilizados es el ensayo de tensión resistida del aislamiento principal, que consiste en aplicar una tensión definida entre el conductor principal y la pantalla del cable. [1]

Para que el ensayo sea preciso, una solicitación eléctrica considerablemente mayor a la de operación debe ser aplicada. La solicitación ideal implicaría una tensión alterna similar a la de servicio. Sin embargo, a frecuencias industriales, los cables se comportan como grandes

cargas capacitivas con valores del orden de los $300 \frac{\mu F}{m}$. Este comportamiento hace necesaria una fuente de tensión con una potencia tal que haría impráctica cualquier medición en campo. [2]

Como alternativa, durante muchos años se ha utilizado la tensión de continua como método de ensayo de aislación, en particular en cables de papel impregnado. [3] En el caso de cables con aislación polimérica, esta práctica ha sido rechazada por las normas internacionales, en primer lugar, porque este tipo de tensión no es adecuado para detectar fallas en dieléctricos poliméricos y, en segundo lugar, por la posibilidad de daños al aislamiento.

La polarización del XLPE se caracteriza por tener constantes de tiempo muy largas. Las mismas se vuelven un problema ante la necesidad de las distribuidoras de poner en servicio rápidamente al cable. Si al momento de energizar el cable, existen tensiones internas generadas por la polarización del dieléctrico, los transitorios de maniobra se vuelven mucho más solicitantes para el aislamiento y la integridad del cable.

Este trabajo busca caracterizar la magnitud de fenómenos transitorios que afectan al cable al energizarlo con la tensión de AC de servicio, luego del ensayo con tensión de DC por medio de un modelo eléctrico de cables de XLPE, de manera tal que se puedan extraer conclusiones sobre la correcta ejecución de los ensayos.

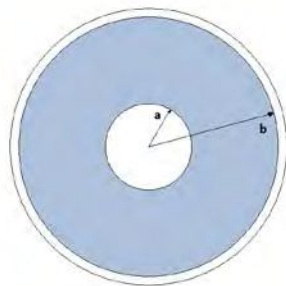
Para caracterizar el comportamiento del cable ante las solicitaciones de DC y de AC fue necesario realizar dos modelos del mismo. Se utilizó el software ATPDraw de transitorios electromagnéticos. Ambos modelos fueron realizados tomando como base una muestra de cable con las siguientes características: Tensión nominal de 8.7 kV, conductor de aluminio de 185 mm² de sección, aislación de XLPE de 3.9 mm de espesor y longitud de 5.8 m.

Modelo de DC

Para realizar este modelo circuital se obtuvieron los principales parámetros que caracterizan al cable, y adicionalmente, se agregaron ramas en paralelo que representan las constantes de tiempo involucradas en la polarización del XLPE. Los parámetros del cable se calcularon en base a la geometría del mismo y las características de sus materiales [4]. Los valores se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Parámetro	Ecuación	Valor calculado	Valor medido
$Ra \text{ [T}\Omega \text{]}$	$\frac{\ln(b/a)}{2\pi\sigma_{XLPE} \cdot l}$	>1.08	1.85
$Rc \text{ [m } \Omega \text{]}$	$\frac{l}{\sigma_{Al} \cdot S}$	0.90	0.91
$Lc \text{ [}\mu\text{H } \text{]}$	$\frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi} \cdot \ln(b/a')$	0.75	-
$Cg \text{ [nF } \text{]}$	$\frac{2\pi\epsilon_{XLPE} \cdot l}{\ln(b/a)}$	2.04	1.52



$$\begin{aligned}\sigma_{Al} &= 35 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \\ \sigma_{XLPE} &< 10^{-14} \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} \\ \epsilon_{XLPE} &\cong 2.5 \\ a &= 8.05 \text{ mm} \\ a' &= 0.7788 \cdot a \\ b &= 11.95 \text{ mm}\end{aligned}$$

Figura 1

Una forma de caracterizar la polarización que presenta un cable es mediante el ensayo de corriente de polarización. La misma puede ser caracterizada mediante el modelo de Debye, por tres ramas RC paralelo que representan distintos procesos de polarización [5]. Las ramas de polarización se obtuvieron a partir de un ensayo de corriente de polarización presentado en la Figura 2. Se utilizó un equipo IDAX 300 marca Megger.

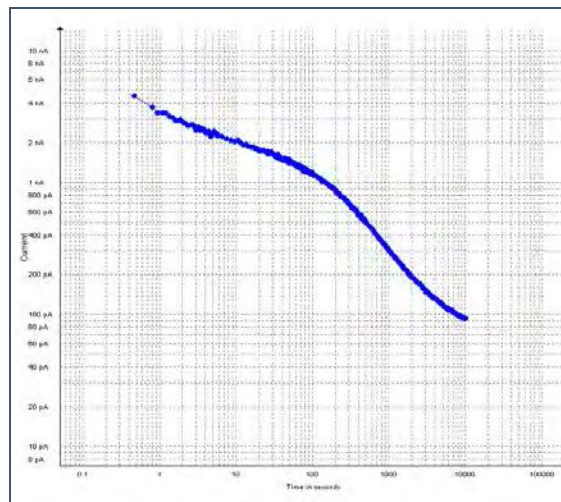


Figura 2

La curva se aproximó mediante la suma de tres exponenciales y una constante según se muestra en la Ecuación 1.

$$i_p = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \cdot e^{-t/\tau_i} + C \quad \text{Ecuación 1}$$

Las variables obtenidas se relacionan con los parámetros del circuito según las siguientes ecuaciones:

$$R_i = \frac{U_{\text{ensayo}}}{\alpha_i} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$C_i = \frac{\tau_i}{R_i}$$

Ecuación 3

$$R_\alpha = \frac{U_{\text{ensayo}}}{C}$$

Ecuación 4

Para realizar el ajuste de las tres exponenciales, se utilizó un método de ajuste iterativo, conocido como método de los gradientes decrecientes (*Steepest Descent*) para minimizar el error cuadrático medio de la función de ajuste. La corriente de polarización resultó:

$$i_p(t) = 2.0705 \cdot e^{-t/3.0713} + 0.9704 \cdot e^{-t/77.0015} + 0.8854 \cdot e^{-t/700} + 0.1081 \quad [\mu A]$$

Donde:

$$R_1 = 96.60 \text{ G}\Omega$$

$$C_1 = 31.80 \text{ pF}$$

$$R_2 = 206.10 \text{ G}\Omega$$

$$C_2 = 373.61 \text{ pF}$$

$$R_3 = 225.89 \text{ G}\Omega$$

$$C_3 = 3098.90 \text{ pF}$$

$$R_\alpha = 1.85 \text{ T}\Omega$$

El modelo final del cable con los parámetros obtenidos se muestra en la Figura 3. Adicionalmente se colocó una fuente de tensión U_c y una resistencia R_p que permiten caracterizar el equipamiento de prueba del ensayo de tensión de DC aplicada. El valor de

R_p se estableció en $345 \text{ k}\Omega$, valor correspondiente a $10000 \frac{\Omega}{\text{kV}}$ que recomienda [3] (que si bien no es una referencia para este tipo de cables, es la única norma que detalla las características de la resistencia de descarga).

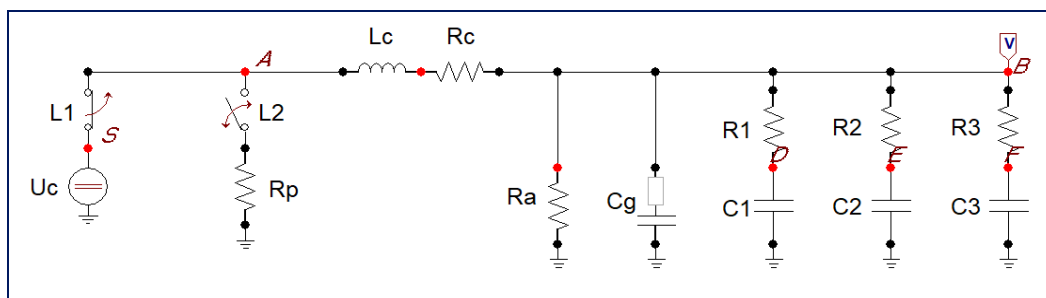


Figura 3

Donde:

U_c : Tensión de DC aplicada durante el ensayo.

R_p : Resistencia de la pértiga utilizada para descargar el cable luego del ensayo.

R_c y L_c : Resistencia e inductancia del cable.

R_a : Resistencia de aislamiento.

C_g : Capacidad geométrica.

R_i y C_i ramas que permiten representar la polarización del material dieléctrico.

Simulación

Una vez obtenidos todos los parámetros, se procedió a realizar distintas simulaciones. El switch L1 comienza en la posición cerrado y se abre según el tiempo estimado de aplicación de la tensión de ensayo. Inmediatamente se cierra L2 durante un tiempo de descarga t_d por medio de una resistencia de descarga R_p .

La tensión y tiempo de ensayo estandarizados son $4 U_0$ y 15 min, tal como lo indica la norma IEC 60502-2:2014 [1] para este tipo de cables.

En todas las simulaciones se pudo observar la aparición de una tensión remanente en el cable, luego de extraer la resistencia de descarga.

Se realizó una comparación de la respuesta de los ensayos frente a distintas condiciones, a saber:

Distintos valores de resistencia de descarga del cable luego del ensayo.

Distintos tiempos de descarga.

3. Distintos tiempos de aplicación de tensión.
 4. Distintos valores de U_{ensayo} .
- A continuación, se presentan cada uno de los casos:

Distintas resistencias de descarga: La aplicación de tensión fue de $4 U_0$ - 15 min. Se comparó la tensión remanente en el cable utilizando $R_p = 0$ (cortocircuito a tierra), $R_p = 345 \text{ k}\Omega$ recomendado en [3] y $R_p \rightarrow \infty$ representando el caso de que el cable no se descargue luego de la prueba. Los resultados se presentan en la Figura 4.

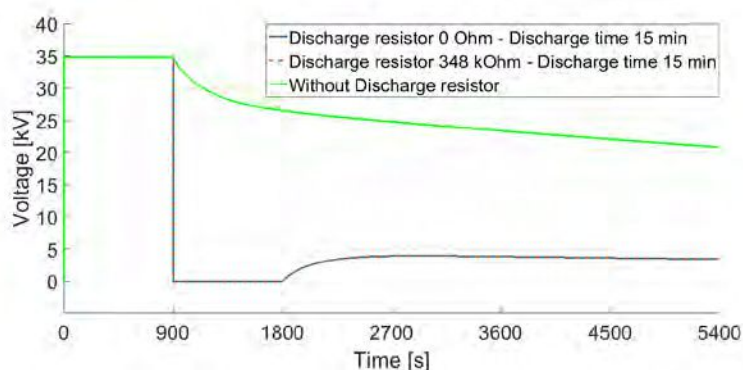


Figura 4

Distintos tiempos de descarga: La aplicación de tensión fue de $4 U_0$ - 15 min. Se comparó la tensión remanente frente a distintos tiempos de descarga. Los resultados se presentan en la Figura 5.

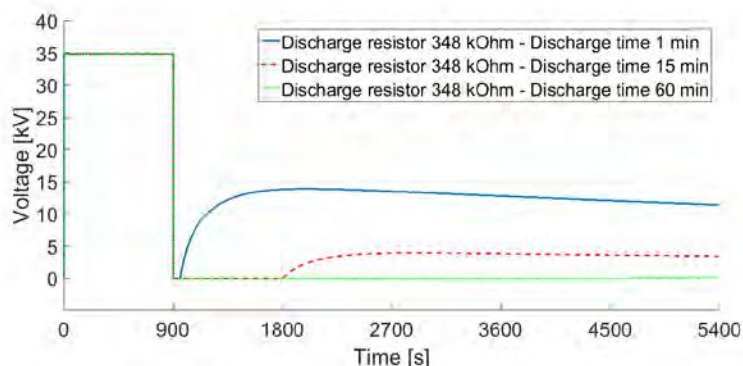


Figura 5

Distinto tiempo aplicado: La aplicación de tensión fue de $4 U_0$. Se realizaron comparaciones de distintos tiempos de aplicada esta tensión de ensayo. La resistencia de descarga fue de $R_p = 348 \text{ k}\Omega$ colocada en el circuito durante 15 min. La norma IEC 60502-2 [1] contempla la realización del ensayo con menor duración, principalmente en cables que ya han estado en uso. Los resultados se ven en la Figura 6.

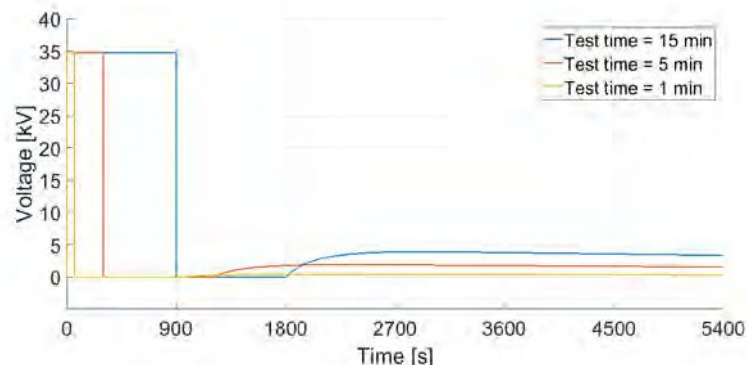


Figura 6

Distinta tensión aplicada: En este caso se aplicaron distintos valores de tensión de continua con una duración fija de 15 min. La resistencia de descarga fue de $R_p = 348 \text{ k}\Omega$ colocada en el circuito durante 15 min. La norma IEC 60502-2 [1] contempla la realización del ensayo con menores tensiones, principalmente en cables que ya han estado en uso. Los resultados se ven en la Figura 7.

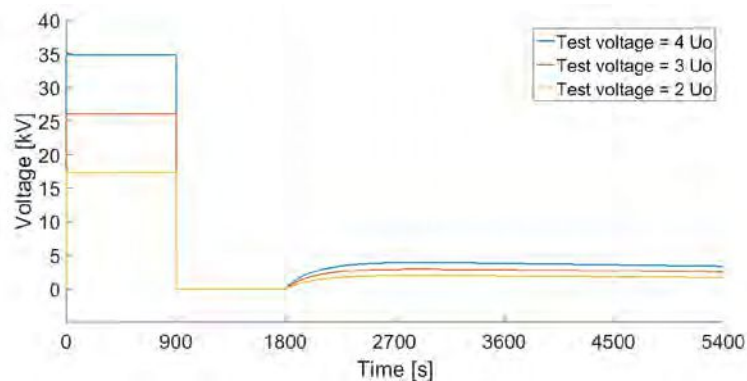


Figura 7

Modelo de AC

Una vez conocida la tensión que aparece en el cable luego del ensayo de DC, se elaboró un modelo para visualizar sus efectos al momento de la energización. La topología del circuito se muestra en la Figura 8.

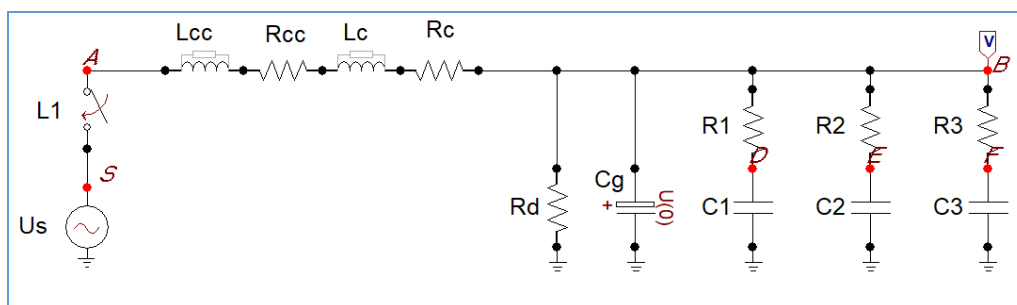


Figura 8

Donde:

U_s : Tensión del sistema de potencia.

L_{cc} y R_{cc} : Parámetros obtenidos a partir de la impedancia de la red. Se adoptó un valor

$S_{cc} = 200 \text{ MVA}$ y $\frac{X}{R} = 30$.

R_d : Resistencia del dieléctrico a 50 Hz (medida mediante un ensayo de $\tan \delta$).

El valor de R_d resultó $1.43 \text{ G}\Omega$. El resto de los parámetros coinciden con el modelo de DC. A los efectos de representar la tensión remanente resultante del modelo de DC, se utiliza una tensión inicial en C_g .

La comparación de las tensiones máximas de energización ante distintas condiciones de tensión de retorno de DC permite visualizar como se genera una condición más desfavorable en el instante de energización. Se tomó el instante de energización como el peor caso, que se da cuando al estar el cable con tensión positiva, el instante de cierre ocurre en un máximo negativo de la onda de AC de la red. Los resultados para 15 kV de tensión de retorno se pueden ver en distintas escalas de tiempo en las Figura 9 y Figura 10.

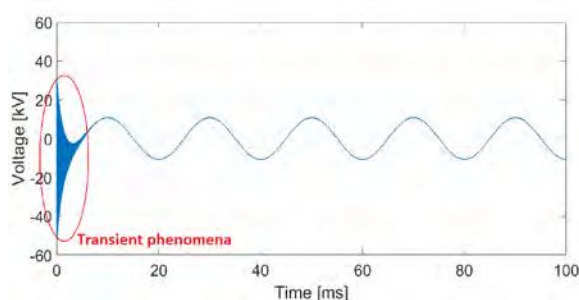


Figura 9

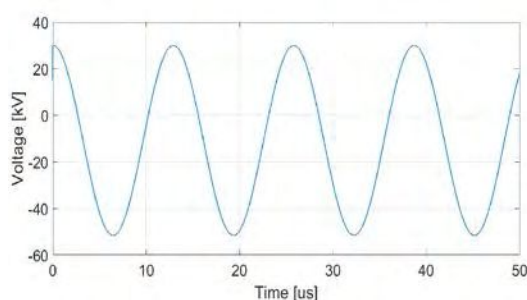


Figura 10

Los valores picos máximos para distintos valores de tensión de retorno pueden visualizarse en la Tabla 2.

Tabla 2

Caso	Energización normal	3 kV	5 kV	10 kV	15 kV	20 kV
Tensión pico [kV]	21.5	27.6	31.6	41.5	51.5	61.5

CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado se puede concluir que:

El ensayo de tensión DC aplicada que se realiza para verificar el estado de los cables puede ser causante del deterioro de los mismos, si no se realiza de manera adecuada.

Las características de las sobretensiones que se manifiestan en la energización del cable dependen de la tensión remanente que queda en el mismo por efecto de la polarización.

El valor de esta tensión remanente depende de las características físicas del polietileno, pudiendo caracterizarse con un ensayo de corriente de polarización.

Es importante utilizar una resistencia de descarga luego del ensayo. Su valor óhmico carece de importancia a los efectos de liberar la carga atrapada. Debe prestarse especial atención al tiempo en que la misma se encuentra conectada. Es recomendable un tiempo de al menos 4 veces el tiempo total de ensayo.

El tiempo de aplicación y el valor de la tensión aplicada de DC también influye sobre las tensiones generadas. La norma para este tipo de cables [1] contempla la realización del ensayo con tiempos y tensiones menores si el cable ya ha estado en servicio.

REFERENCIAS

- [1] IEC 60502-2:2014 "Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2 \text{ kV}$) up to 30 kV ($U_m = 36 \text{ kV}$) – Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2 \text{ kV}$) up to 30 kV ($U_m = 36 \text{ kV}$)".
- [2] Lee Wai Meng "The dangers of DC high voltage test for XLPE cables at site". The Singapore, Chapter 1. April 2001.
- [3] IEEE Std. 400-1-2007 "IEEE Guide for Field Testing of Laminated Dielectric, Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with High Direct Current Voltage".

- [4] “*Materiales Electrotécnicos*” José Ramírez Vázquez, 4ª Edición. Editorial: Ed. CEAC. Enciclopedia CEAC de Electricidad. Barcelona, 1986.
- [5] M. Beigertand, H.G. Kranz, “*Destruction free ageing diagnosis of power cable insulation using the isothermal relaxation current analysis*”. Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, USA, 1994.